

不連続性岩盤解析の力学パラメータの同定に関する検討

AN IDENTIFICATION METHOD OF THE MECHANICAL PROPERTIES FOR DISCONTINUOUS ROCK MASS ANALYSIS

若林成樹*・多田浩幸*

Naruki WAKABAYASHI, Hiroyuki TADA

Recently, many kinds of discontinuous analysis are frequently utilized for estimation of rock mass behavior. These analysis need very difficult input properties, for example, joint distribution permeate, rock mass and joint mechanical properties. So it is very useful to be able to identify them from the measurement data. In this paper, identification methods of Young's modules of rock mass and shear-normal stiffness of joints by using distinct element method (UDEC) and clack tensor method are described. The identified joint mechanical properties are smaller than the results of laboratory tests because of simple joint distribution model, scale effect and neglection of joint slip and dilatancy.

1. はじめに

岩盤挙動評価に個別要素法(UDEC), MBC法やクラックテンソル法などの不連続体解析が盛んに利用されてきている。これらの解析には不連続面の分布状況, 不連続面や岩盤の力学特性に関する入力定数が必要になる。しかし, それぞれの解析手法ごとに様々な仮定や簡略化がなされているため, 現地調査や各種試験で評価された分布状況や力学特性値をそのまま入力定数として解析に導入できるわけではない。幸いにも不連続体解析が適用されるのは大規模な岩盤空洞の場合が多く, 各種の計測が行われる。その計測結果から入力定数を同定し, 以後の予測に利用できれば非常に有効である。例えば清水ら¹⁾は個別要素法で各ブロックの3点の変位から最終変形量を推定したり, 日比野ら²⁾は解析値と計測値との誤差の自乗和が最小になるようにMBC法の各種入力定数を同定している。本報告では空洞掘削時の岩盤内変位の計測結果を用いて, 物性をパラメトリックに変化させたUDEC解析とクラックテンソル解析に拡張カルマンフィルタを導入した逆解析によって同定した岩盤基質の弾性係数, 不連続面のせん断・垂直剛性と室内試験で得られた物性を比較検討した結果を報告する。

2. 解析対象

解析の対象としたのは図-1に示す土被り約1,000mの非常に良好な角閃石片麻岩中に掘削された直径40m, 高さ57mのドーム型空洞である。空洞はロックボルト, ケーブルボルト, 吹付けコンクリートで支保されている。施工中は岩盤内変位, 内空変位, ロックボルト軸力などが計測された。空洞中央付近の断面には図中に示すように①～③の3本の岩盤内変位計が設置されている。①, ②は空洞内側から設置した変位計で長さ20mで深度0, 1, 3, 6, 10, 15mの6測点である。③は空洞掘削前に上部坑道から設置した変位計で長さ40m

* 正会員 清水建設技術研究所 地下技術開発部

で1mピッチの測定が可能となっている。

主要な不連続面は図中の天端スケッチに示すように概ねNE～SW系とNW～SE系の2系統あり、NE～SW系が連続しており卓越している。両系統とも傾斜は70～90°と比較的立った不連続面となっている。また、スケッチには記載されていない小規模な不連続面が数10cm間隔で存在している。

岩盤の力学特性に関してボーリングコアの一軸圧縮試験と不連続面のせん断試験・垂直載荷試験を実施した。不連続面は直径150mmのボーリングでコア中央に不連続面が位置するようにボーリングの位置・角度を調整して採取した。一軸圧縮試験からコアの弾性係数として50.3GPa、ポアソン比0.25を得た。また、不連続面のせん断試験と垂直載荷試験結果を図-2に示す。せん断変形は顕著な非線形挙動を呈し、明確なピークを示さない。垂直応力が2.9MPa下のせん断剛性 K_s は50～4GPa/mとなる。垂直変形挙動も顕著な非線形性を示し、載荷・除荷に伴い変形が進行する。3回目の除荷時の垂直応力が2.9～0MPaの割線から垂直剛性 K_n を求めると概ね30～100GPa/mとなる。

3. UDEC 解析による物性同定方法

UDEC解析には不連続面の分布モデルと岩盤基質の弾性係数 E ・ポアソン比 ν 、不連続面のせん断剛性 K_s ・垂直剛性 K_n が必要となる。同定する物性値は E 、 K_s 、 K_n とし、 ν は岩石コアの0.25とした。今回は物性値のスケール効果、非線形性、滑りやダイレイション、ロックボルトなどの支保の影響は考慮せず同定物性に反映させることにした。

UDEC解析では逆解析の定式化が困難なため、同定する物性値をパラメトリックに変化させ、次式に示す岩盤内変位の解析値と観測変位との誤差の自乗和が最小になるような物性値を求めることにした。

$$\text{誤差自乗和} = \sum (\text{解析値} - \text{観測変位})^2 \text{ ----(1)}$$

観測変位は変位計①、②の各6測点と1mピッチで計測されている変位計③の内、①、②と同位置の6測点を用いた。

岩石コアの弾性係数が50.3GPaであることから、 E は20,30,40,50GPaの4ケースを想定した。 K_s と K_n を独立して変化させると解析ケースが膨大になるため、剛性比(K_n/K_s)は一定として連動させた。図-2より垂直応力が2.9MPaのもとで K_s は50～4GPa/m、 K_n は30～100GPa/mとなり、剛性比は0.6～25となることを考慮して剛性比が1と10の2ケースを想定した。

不連続面の分布モデルは図-1の天端と空洞周辺坑道のスケッチから広域に連続していると判断された不連続面はその位置を入力し、他の不連続面はスケッチから平均間隔・分散を算出して密度が同じになるように統計的に不連続面を発生させて作成した。ブロックを形成しない不完全な不連続面を削除して作成した200m×200mの領域の分布モデルを図-3に示す。

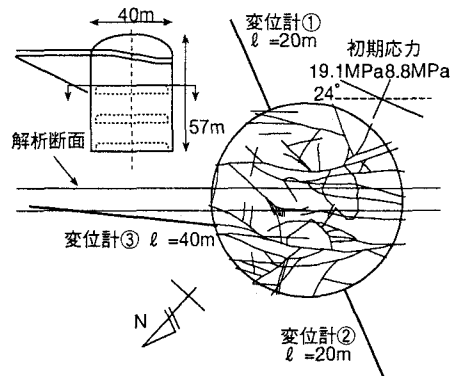


図-1 空洞と変位計の設置位置および不連続面のスケッチ

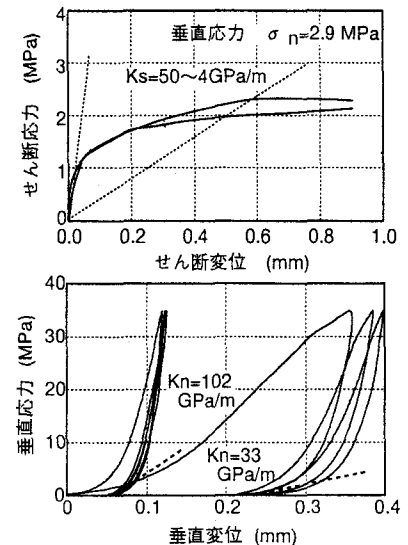


図-2 不連続面のせん断試験・垂直載荷試験結果

4. クラックテンソル解析による物性同定方法

クラックテンソル解析は、クラックテンソルによる不連続性岩盤の応力とひずみの関係³⁾を有限要素解析プログラムに組み込んだものであり、岩盤を等価な異方弾性体として表現する。この解析には不連続面の分布特性を表す2階と4階のクラックテンソル (F_{ij}, F_{ijkl}) と、岩盤基質部の弾性係数 E 、ポアソン比 ν と不連続面のせん断剛性 K_s ・垂直剛性 K_n が必要となる。UDEEC 解析と同様に ν は 0.25、同定物性は E 、 K_s 、 K_n の3つとし、滑りやダイレイション、支保は考慮しない。

物性の同定には、クラックテンソルによる不連続性岩盤の応力とひずみの関係を組み込んだ2次元有限要素解析コードに拡張カルマンフィルタ逆解析手法を組み合わせた解析コード^{4),5)}を用いた。クラックテンソル解析において、不連続面の垂直剛性 K_n とせん断剛性 K_s は、不連続面の長さを r とすると、 $K_n = h/r$ 、 $K_s = g/r$ で近似され、解析では応力の次元を持つ定数 h, g が入力パラメータとして用いられる。よって、逆解析では、この不連続面の垂直とせん断の剛性に関するパラメータ h, g を推定した。具体的には、空洞掘削による観測変位を入力値として、推定パラメータ h, g の初期値 h_0, g_0 を設定し、拡張カルマンフィルタによる推定パラメータ h, g が収束するまで繰り返し計算を行い、推定値を決定する方法とした。逆解析に用いた解析メッシュを図-4に示す。観測変位については同図に示す変位計①と変位計③の壁面からの深度が0,3,6mの3地点における岩盤内変位を入力した。解析は、岩盤基質部の弾性係数 E をパラメータとして、 $E=30, 40, 50\text{GPa}$ の3ケースを設定した。不連続面の幾何学的特性を示す2階と4階のクラックテンソル F_{ij}, F_{ijkl} は、図-1に示すスケッチから個々の不連続面の長さや方向を求め、次式により決定した。

$$F_{ij} = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^M (r^{(k)})^2 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad \text{-----(2)}$$

$$F_{ijkl} = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^M (r^{(k)})^2 n_i^{(k)} n_j^{(k)} n_k^{(k)} n_l^{(k)} \quad \text{-----(3)}$$

ここで、 M は対象とする面積 S 中に含まれる不連続面の総数であり、 $r^{(k)}$ は k 番目の不連続面の長さ、 $n_i^{(k)}$ は不連続面の法線方法を向く単位ベクトル $n^{(k)}$ の基準軸 $x_i (i=1, 2)$ への成分を示す。解析に用いた2階と4階のクラックテンソル F_{ij}, F_{ijkl} を次式に示す。

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.77 & 0.26 \\ \text{sym} & 5.58 \end{bmatrix} \quad \text{-----(4)}$$

$$F_{ijkl} = \begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1112} \\ F_{2211} & F_{2222} & F_{2212} \\ F_{1211} & F_{1222} & F_{1212} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.49 & 0.28 & -0.01 \\ & 5.31 & 0.26 \\ \text{sym.} & & 0.28 \end{bmatrix} \quad (5)$$

また、推定パラメータ h, g の初期値 h_0, g_0 は文献⁵⁾を参考にし、 $h_0 = 2E/\pi$ 、 $g_0 = h_0/5$ とした。

5. UDEEC 解析による同定結果

図-5に誤差自乗和と E, K_s, K_n との関係を示す。図中には

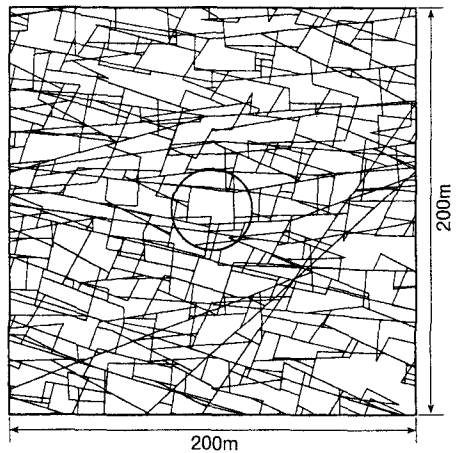


図-3 UDEEC 解析の不連続面分布モデル

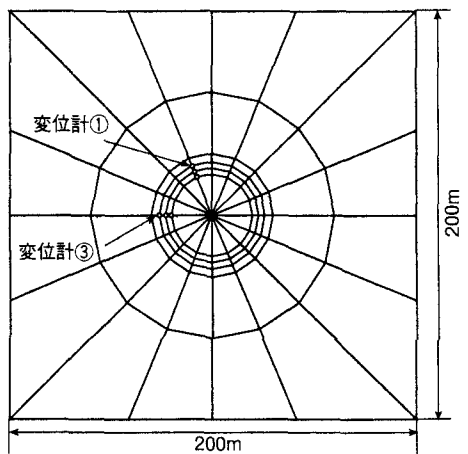


図-4 クラックテンソル解析のメッシュ

各Eにおける最小の誤差自乗和も記した。Kn/Ks=1の場合、Eが50～30GPaではKs,Knは2.5GPa/m、Eが20GPaでは5.0GPa/mで最小誤差となる。最小誤差値はEによって2011～2288mm²の範囲で変化するが、E=40,30GPa、Ks,Kn=2.5GPa/mの場合の誤差が最も小さくなる。Kn/Ks=10の場合、Eが小さくなるにつれて誤差が最小になるKs、Knは大きくなる。誤差が最小となるのはE=50GPa、Ks=1.0GPa、Kn=10GPa/mの場合である。また、Kn/Ks=1の方がKn/Ks=10の場合より全体に誤差は小さく、全ケース中E=30,40GPa、Ks=Kn=2.5GPa/mの誤差が最小となり最も観測値に近い変形挙動を与える物性値となる。このときの変位計①～③の観測値と解析値の比較を図-6に示す。変位計②は解析値と観測値はほぼ一致するが①では解析値の方が小さく、逆に③では解析値の方が大きくなっている。

6. クラックテンソル解析による同定結果

逆解析より得られたh,gの収束状況の一例として、E=50GPaのケースの結果を図-7に示す。各ケースとも100回の繰り返し計算を行った。どのケースもhはほぼ収束するが、gは徐々に増加する傾向を示す。そこで、今回は、hがほぼ収束すると見なせる55回目のh,gの値を求めるべき推定値と判断した。各ケースの推定結果を表-1に示す。同表には不連続面の長さrを平均値の9.7mとしてh,gを換算したKn,Ksの剛性値も併せて示した。これによると、Eが増加するに従い、h,gは低下し、剛性比h/gも0.41から0.36へと減少する。また、各ケース毎に推定値h,gを用いて順解析を行い、解析値と観測値との誤差の自乗和を求めると、E=50GPaのケースが最小となった。よって、E=50GPa、h=21.0GPa(Kn=2.2GPa/m)、g=59.1GPa(Ks=6.1GPa/m)のケースが最も観測値に近い変形挙動を予測する物性となる。このときの変位計①～③の観測値と解析値の比較を図-8に示す。変位計③は解析値と観測値はほぼ一致しているが、①では解析値の方が小さくなっている。②は逆解析の観測値には用いていないが、観測値とはほぼ一致してい

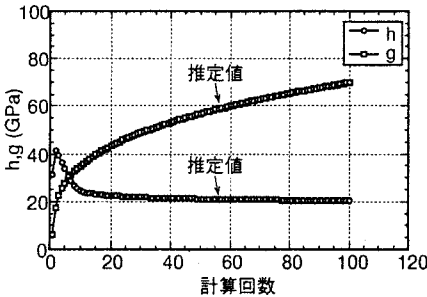


図-7 h,gの収束状況 (E=50GPa)

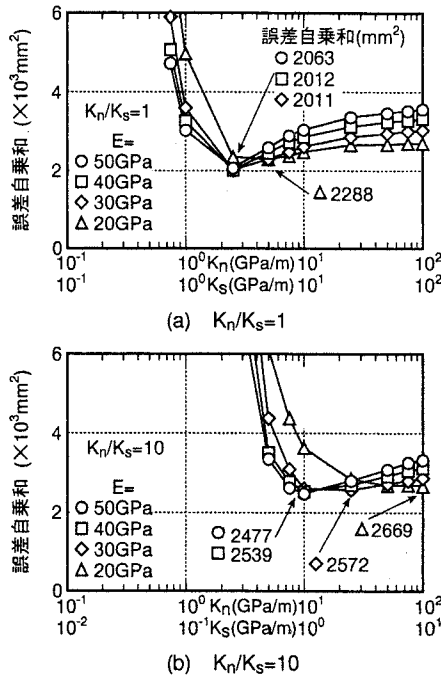


図-5 誤差の自乗和

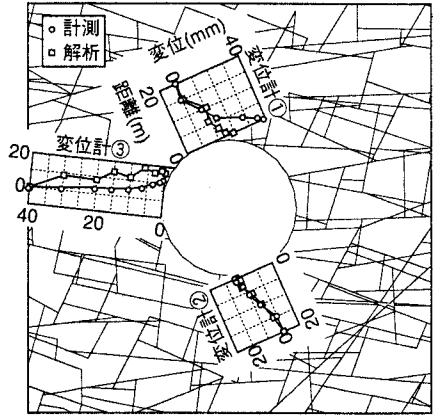


図-6 UDEC 解析による解析変位と観測値の比較

表-1 弾性係数Eごとの収束物性値

E (GPa)	h (GPa)	Kn (GPa/m)	g (GPa)	Ks (GPa/m)
30	28.9	3.0	70.2	7.2
40	23.6	2.4	63.3	6.5
50	21.0	2.2	59.1	6.1

る。なお、100回計算時の h, g と55回目の h, g を用いた順解析による変位分布を比較したがほとんど差はなかった。

7. 考察

UDEC 解析では剛性比(K_n/K_s)が10よりも1の方が誤差は小さく、 $E=30,40\text{GPa}$ 、 $K_n=K_s=2.5\text{GPa/m}$ が観測値を最も良く予測できる物性値として同定された。また、クラックテンソル解析では $E=50\text{GPa}$ 、 $h=21.0\text{GPa}$ ($K_n=2.2\text{GPa/m}$)、 $g=59.1\text{GPa}$ ($K_s=6.1\text{GPa/m}$)が同定された。両解析とも同定された不連続面の物性値が室内試験の物性値に比べて小さいのは分布モデルに取り込まれなかった不連続面の影響やスケール効果、非線形性、滑りやダイレイションなどを考慮しなかった影響によると考えられる。また、計測値と解析値がかならずしも一致しないのは分布モデルと解析領域内を均一物性としたことに起因している。

実際には変位計①付近では解析モデルより不連続面密度が高いか不連続面や岩盤物性が小さいことが想定される。これがクラックテンソル解析においてせん断剛性パラメータの収束が良くない一因とも考えられる。

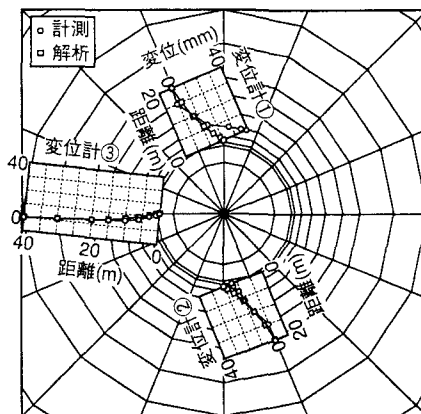


図-8 クラックテンソル解析結果と観測値の比較

8. まとめ

空洞掘削時の岩盤内変位の計測結果実在するからUDEC解析およびクラックテンソル解析によって岩盤基質部の弾性係数 E および不連続面のせん断剛性 K_s 、垂直剛性 K_n を同定し、室内試験から得られた物性値と比較検討した。その結果、次のことが得られた。① UDEC 解析では $E=30,40\text{GPa}$ 、 $K_n=K_s=2.5\text{GPa/m}$ が、クラックテンソル解析では $E=50\text{GPa}$ 、 $h=21.0\text{GPa}$ ($K_n=2.2\text{GPa/m}$)、 $g=59.1\text{GPa}$ ($K_s=6.1\text{GPa/m}$)が観測値を最も良く予測できる物性値として同定された。②同定された不連続面の物性は分布モデルに取り込まれなかった不連続面の影響やスケール効果、非線形性、滑りやダイレイションなどを考慮しなかった影響によって室内試験結果よりも小さくなった。

今後は支保も考慮した解析を行うとともに他現場の計測データを用いた検討を進める予定である。

9. 謝辞

本検討を実施するにあたり、埼玉大学工学部建設工学科の山辺正助教授に貴重なご助言ならびにご指導を頂きました。ここに、厚く謝意を表す次第です。

【参考文献】

- 1)清水則一，垣原裕，寺戸秀和，中川浩二：不連続性岩盤の挙動予測のための計測変位を用いた一逆解析法，土木学会論文集No.547／Ⅲ-36，pp11-22，1996.
- 2)日比野繁信，吉田秀典，堀井秀之，工藤奎吾：トンネル掘削時の計測結果を用いたMBC解析における解析パラメータの同定方法，第28回岩盤力学に関するシンポジウム，pp63-67，1997.
- 3)Oda, M. :An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.2, pp.59-69, 1988.
- 4)山辺正，松本卓也，大矢敏雄：岩盤掘削に伴う変形挙動の逆解析，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-680，pp1360-1361，1995.
- 5)松本卓也：岩盤掘削における力学パラメータの逆解析に関する研究，埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程建設基礎工学専攻平成7年度修士論文，1996.